

# Wer bringt den Müll runter? — Die Problematik Weltraumschrott und mögliche Methoden zur Beseitigung

Dr. Jens Rodmann

DLR, Institut für Technische Physik, Stuttgart

Raumfahrt aus Leidenschaft, 26.01.2017



Wissen für Morgen



A composite image showing a dense field of space debris in orbit above Earth. The left side shows a bright blue and white horizon of the Earth, with numerous small, dark fragments of debris floating in the atmosphere. The right side is a dark, black space filled with a vast number of debris pieces of various shapes and sizes, including small cubes, rods, and larger irregular fragments. The text is overlaid on the right side of the image.

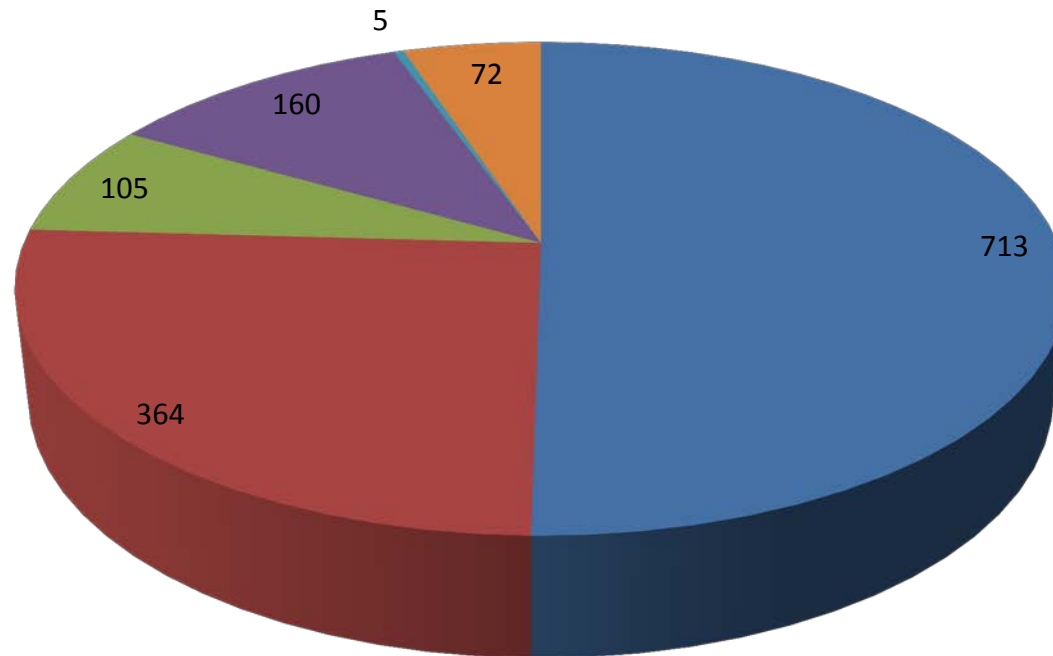
Was ist Weltraumschrott?

Gefahren durch Weltraumschrott

Schutzzonen und Richtlinien

Methoden zur Beseitigung

# Aktuell befinden sich knapp 1500 aktive Satelliten im Orbit und erfüllen verschiedenste Missionen/Aufgaben



UCS Satellite Database,  
Stand Juli 2016

- Kommunikation
- Erdbeobachtung
- GNSS
- Technologieentwicklung
- Weltraumüberwachung
- Wissenschaft





**Weniger als 10% der Objekte im Erdorbit erfüllen einen Zweck — der Rest ist Weltraumschrott (space debris)**



# Der Start einer Nutzlast mit einer Rakete erzeugt viel Schrott

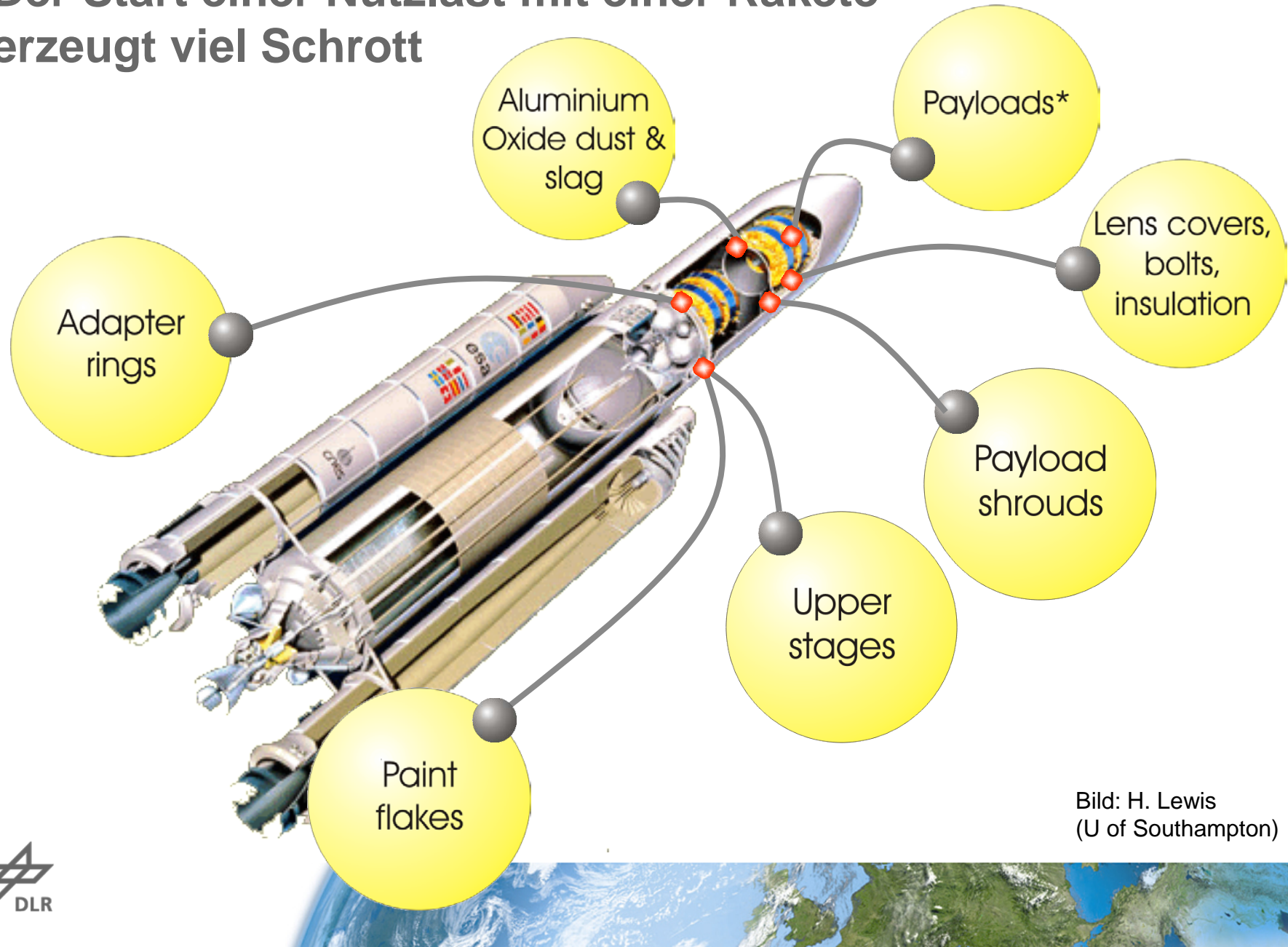
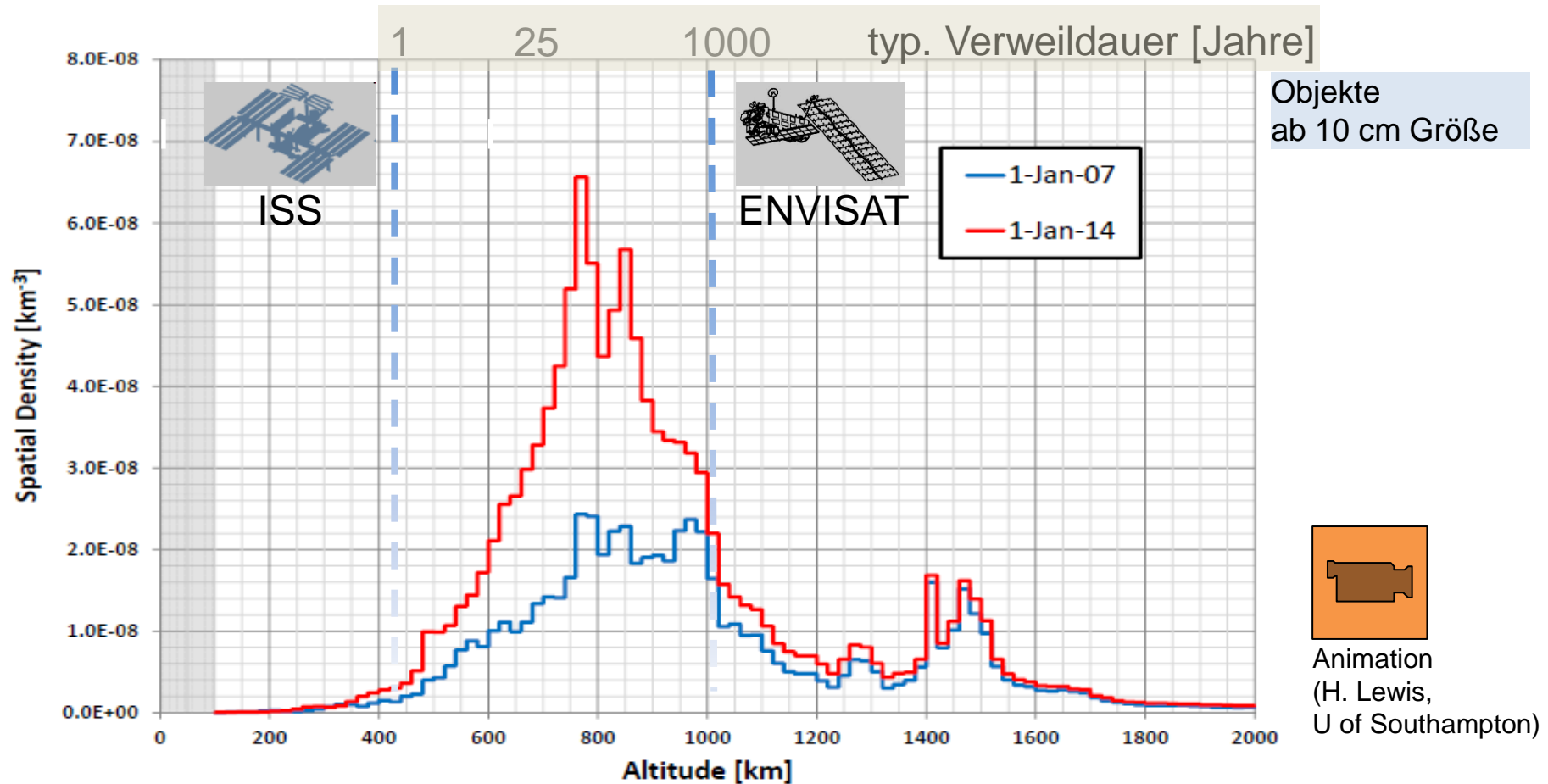
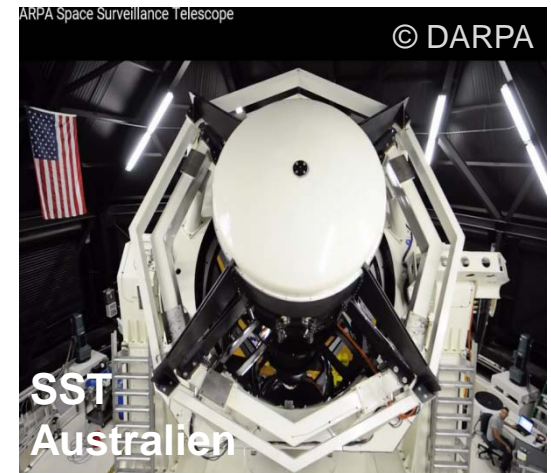


Bild: H. Lewis  
(U of Southampton)

# Auf niedrigen Erdumlaufbahnen (Bahnhöhen <2000 km) sind die Dichten am höchsten, vor allem um 800 km



# Weltraumschrottobjekte werden durch Radaranlagen und optische Teleskope detektiert und verfolgt



Tracking Radar

LEO-Beobachtungen

Passiv-optisch

GEO-Beobachtungen

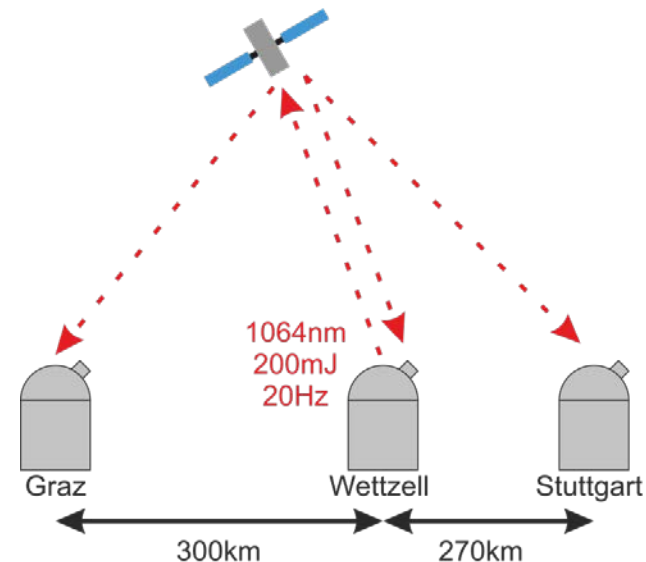
Passiv-optisch

Neudetektion im LEO





# Metergenaue Entfernungsmessung mit Laserpulsen





A detailed illustration of space debris floating in the void of space. The debris consists of numerous small, irregular fragments of various colors (white, grey, yellow, black) and shapes (spheres, cubes, rods, thin sheets). In the background, the bright blue and white horizon of the Earth curves across the lower half of the frame. The overall scene is set against a deep black space background.

Was ist Weltraumschrott?

**Gefahren durch Weltraumschrott**

Schutzzonen und Richtlinien

Methoden zur Beseitigung

# Im niedrigen Erdborbit kommt es häufig zu nahen Begegnungen zwischen Weltraumobjekten

**10. Februar 2009,  
etwa 800 km über Sibirien...**

Relativgeschwindigkeit: 11,7 km/s  
Abstand (Bahnprognose): 584 m

IRIDIUM\_33

COSMOS\_2251

**Iridium 33**

**560 kg**

**aktiv**

**Cosmos 2251**

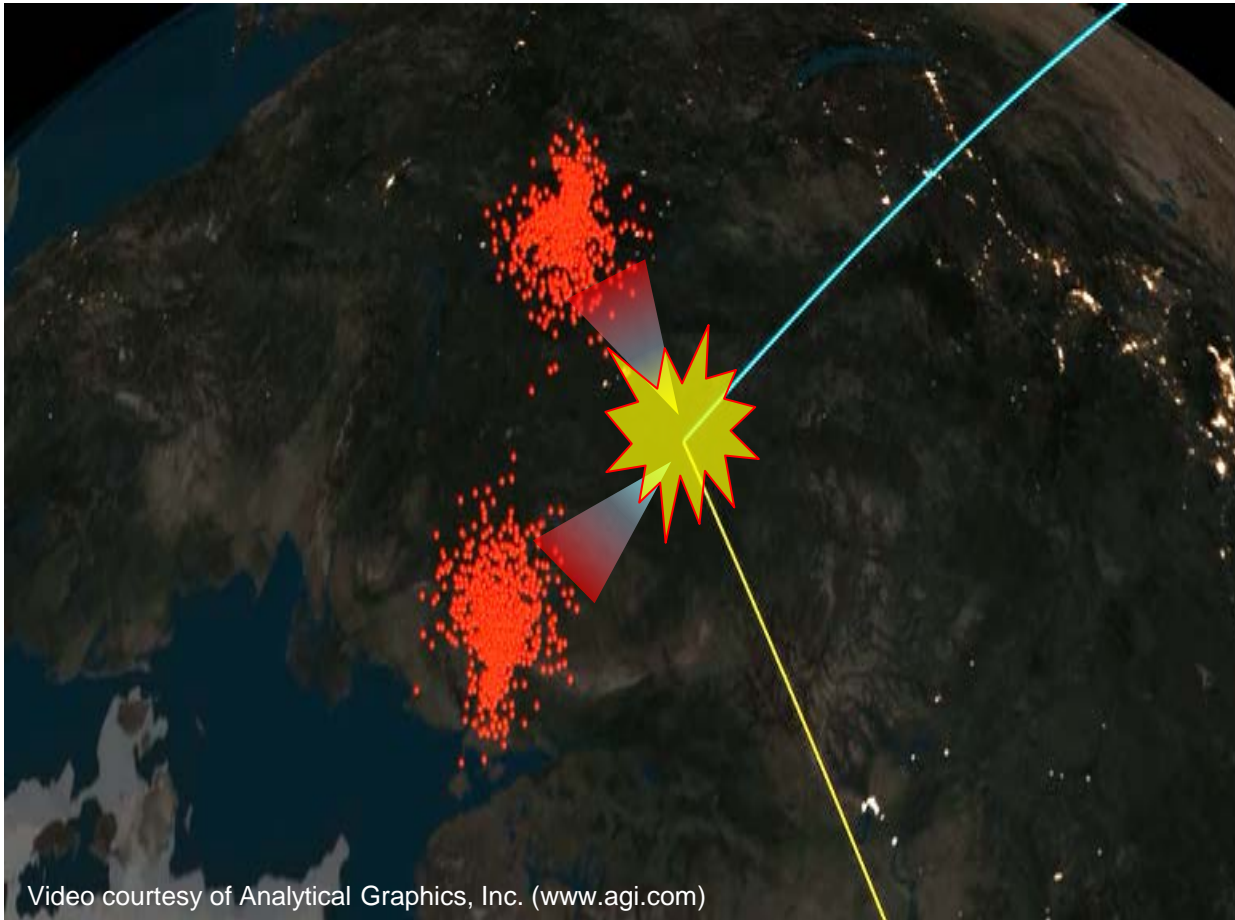
**950 kg**

**inaktiv**

Video courtesy of Analytical Graphics, Inc. ([www.agi.com](http://www.agi.com))



# Kollisionen zwischen Weltraumobjekten kommen vor; beim Zusammenstoß entstehen viele neue Fragmente

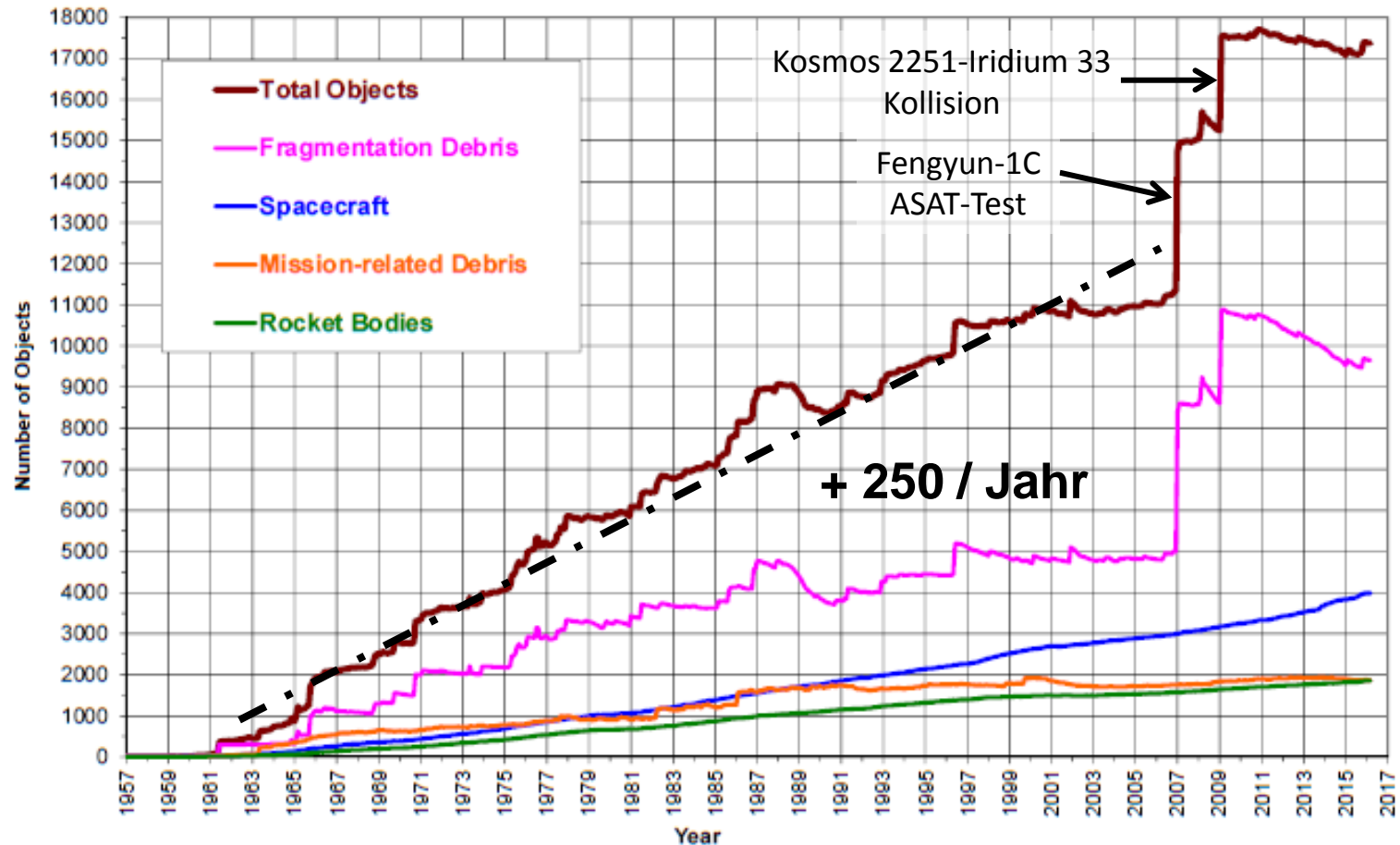


Video courtesy of Analytical Graphics, Inc. ([www.agi.com](http://www.agi.com))

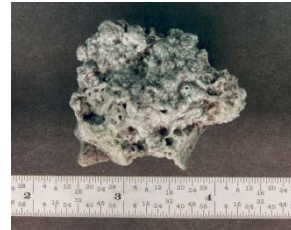
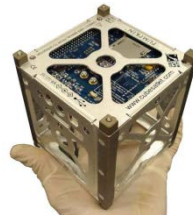
Beobachtbare neue  
Trümmerteile:  
469 von Iridium 33  
1301 von Cosmos 2251



# Die Anzahl der katalogisierten Objekte im Erdorbit wächst kontinuierlich, vor allem durch Fragmentationen



**Nur Objekte größer als ~10 cm können beobachtet und verfolgt werden; die gefährlichen cm-großen Teile nicht**



Größe	> 1 m	> 10 cm	> 1 cm	> 1 mm	> 0,1 mm
Anzahl	~5000	~30000	~750000	~170 Mio	~360 Mrd
Beobachtbar?	ja	ja	nein	nein	nein
Gefährlich?	ja	ja	ja	eventuell	nein

MASTER Modell, ESA



A detailed illustration of space debris floating in orbit above the Earth's surface. The Earth's blue and white horizon is visible on the left side of the image. The right side is a dark, deep space filled with a dense field of debris of various sizes and shapes, including small fragments, larger rectangular panels, and cylindrical components. A bright, glowing blue-white line of light separates the Earth's atmosphere from the dark space, highlighting the debris field.

Was ist Weltraumschrott?

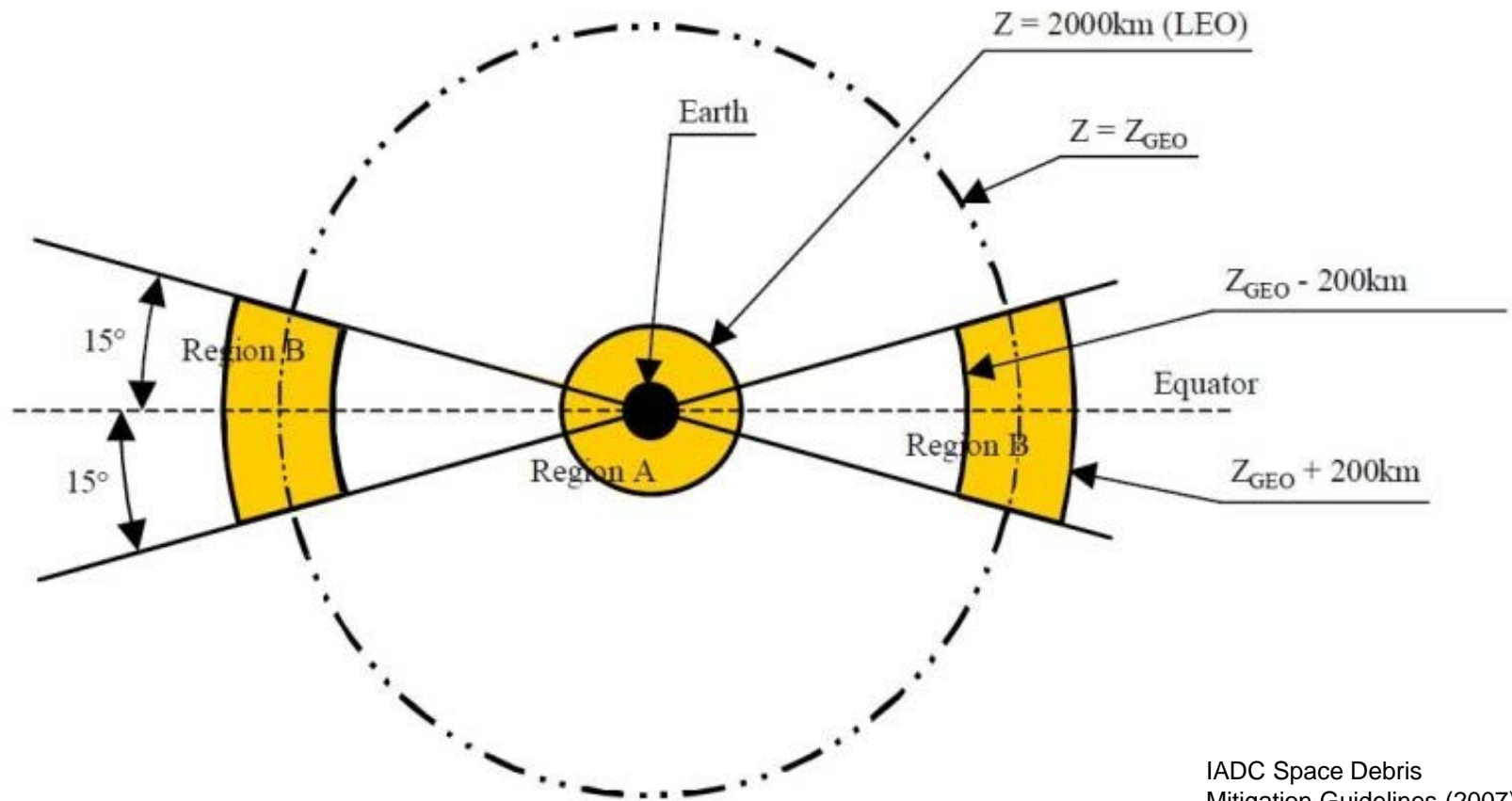
Gefahren durch Weltraumschrott

**Schutzzonen und Richtlinien**

Methoden zur Beseitigung



**Es gibt zwei Schutzzonen, in denen kein Weltraumschrott erzeugt oder hinterlassen werden soll**

IADC Space Debris  
Mitigation Guidelines (2007)

# Verschiedene nationale und internationale Richtlinien versuchen das Wachstum der Schrottmenge zu mildern

## **Start, Inbetriebnahme und Betrieb**

- Anzahl von freiwerdenden missionsbezogenen Objekte begrenzen
- Potential für ein Auseinanderbrechen des Satelliten minimieren
- Wahrscheinlichkeit für Zusammenstöße im Orbit begrenzen

## **Missionsende**

- Passivierung: Gespeicherte Energie (z.B. Druckbehälter, Batterien) abbauen
- Entsorgung: Lebensdauer in Schutzzonen begrenzen (max. 25 Jahre im LEO)

## **Wiedereintritt in die Atmosphäre**

- Eintreten eines Todesfalls durch Einschlag auf weniger als 1:10000 begrenzen

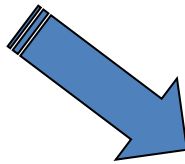
## **Anti-Satelliten-Tests und militärische Konflikte**

- Absichtliche Zerstörung eigener oder fremder Satelliten vermeiden



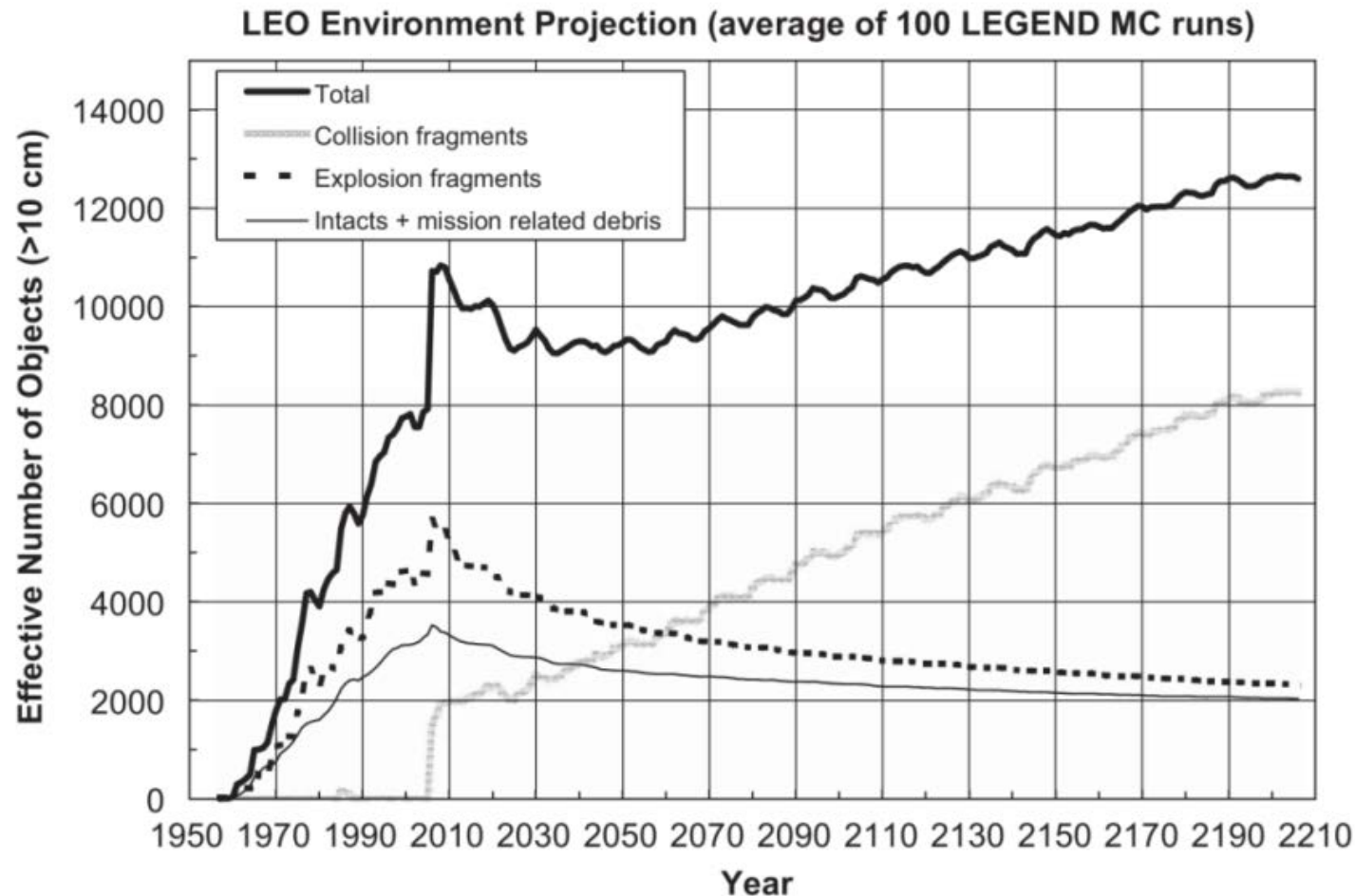
# Satelliten könnten sich durch Erhöhung des Luftwiderstands eigenständig aus dem LEO entsorgen

DeOrbitSail  
3U CubeSat  
700 km SSO  
5 m x 5 m Segel





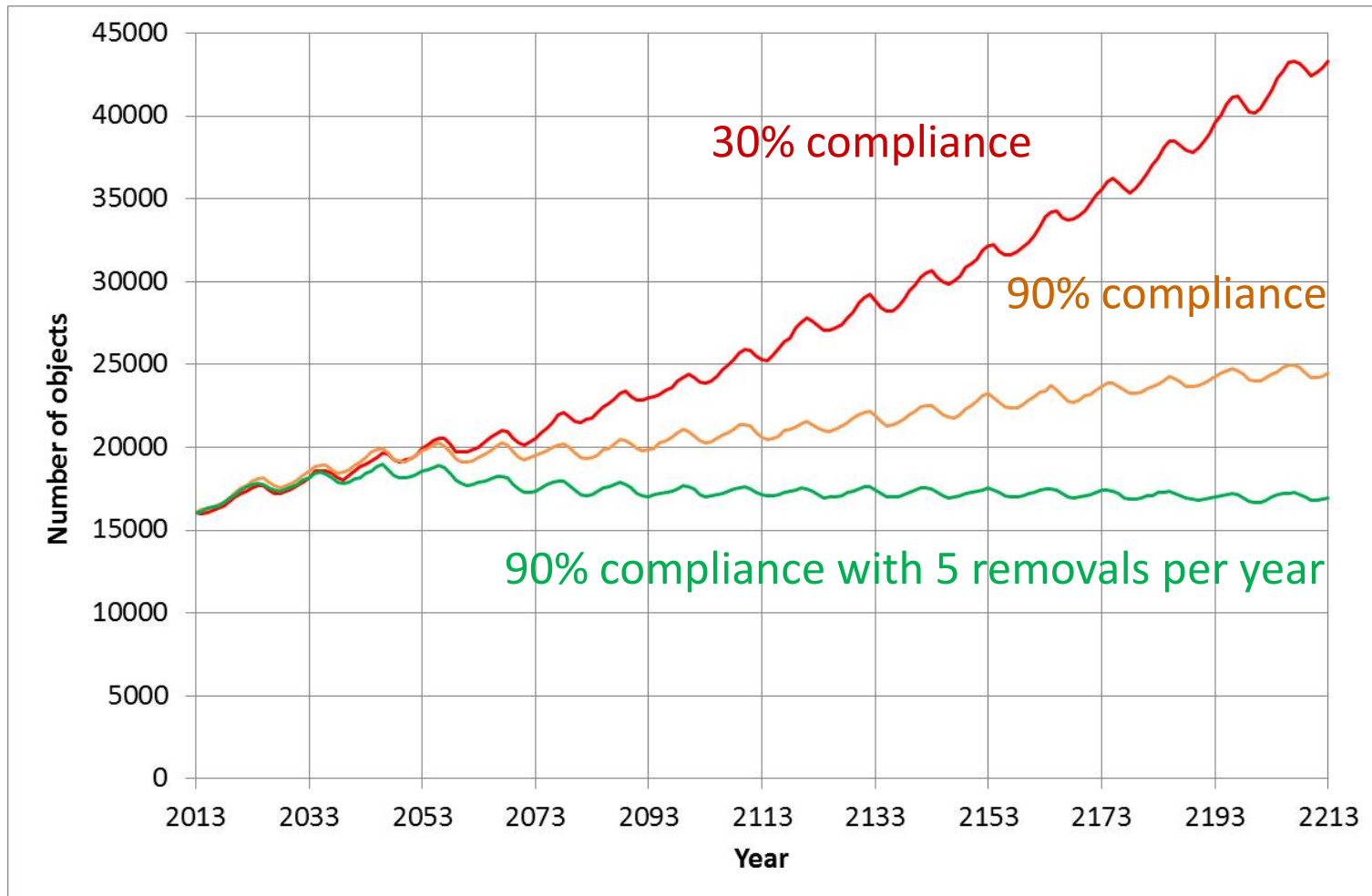
# Die LEO-Schrottpopulation wird in den nächsten Jahrzehnten wachsen und die Situation verschärfen



Liou et al. 2010



# Aktive Entfernung von großen LEO-Schrottobjekten ist nötig, um das Wachstum der Objektzahl zu begrenzen



DAMAGE Modell,  
U of Southampton

A detailed illustration of space debris floating in the void of space. The debris consists of numerous small, irregular fragments of various colors (white, grey, yellow, black) and shapes (cubes, spheres, rods, thin sheets). In the background, the bright blue and white horizon of the Earth is visible, with a thin layer of white clouds. The overall scene is set against the deep black of space.

Was ist Weltraumschrott?

Gefahren durch Weltraumschrott

Schutzzonen und Richtlinien

**Methoden zur Beseitigung**



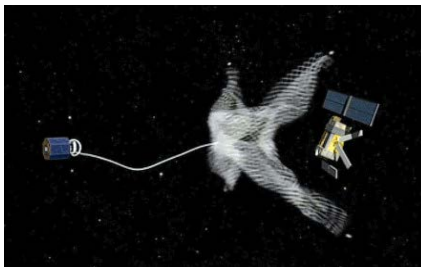
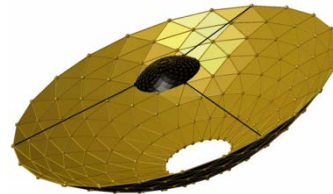
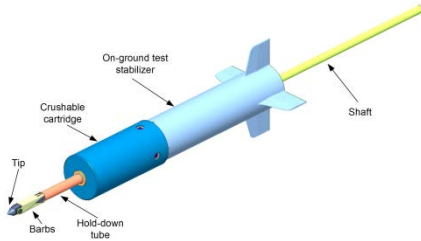
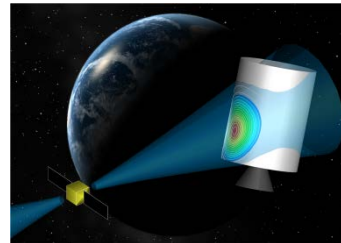
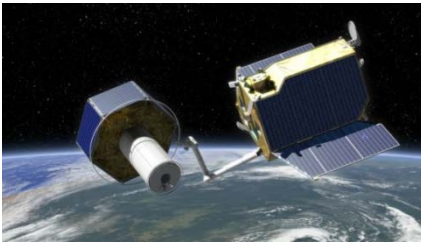
# Eine ganze Reihe an möglichen Methoden zur Beseitigung von Weltraumschrott wurden untersucht

im Weltraum

vom Boden aus

Kontakt

Fernwirkung





# ESA plant die erste Mission zur aktiven Beseitigung eines Weltraumschrottobjekts



**e.deorbit**

## → ADVANCED IMAGE PROCESSING

Dedicated hardware and associated algorithms are necessary to determine the status of the target



## → COMPLEX GNC

Complex autonomous algorithms will safely drive the chaser during synchronised motion and capture of the target



## → INNOVATIVE ROBOTICS

A capture mechanism, such as robotic arm, net or harpoon, will capture the target



**JAN 2023**  
LAUNCH VEGA-C



**JAN 2023**  
ING AT 300KM CIRCULAR ORBIT

**JAN 2023**  
TRANSFER AND PHASING TO TARGET ORBIT

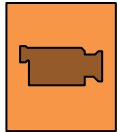
**FEB 2023**  
TARGET INSPECTION

**MAR 2023**  
RENDEZVOUS AND SYNCHRONISATION

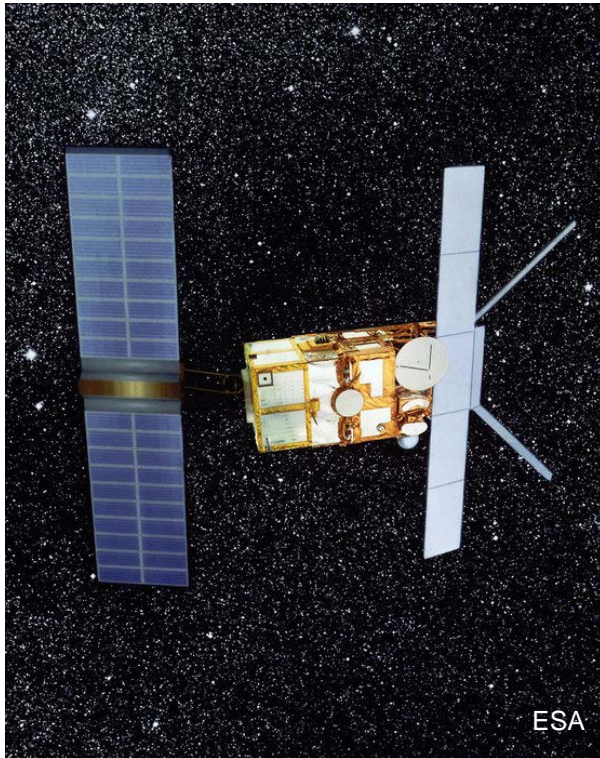
**MAR 2023**  
TARGET CAPTURE

**MAR 2023**  
STABILISATION

**APR 2023**  
DISPOSAL



# Als Zielobjekt der e.deorbit Mission ist einer von zwei ausgedienten Erdbeobachtungssatelliten vorgesehen



**ERS-2** (1995-2010)  
780 km SSO (jetzt 550 km)  
12 x 12 x 2.5 m, 2400 kg



**Envisat** (2002-2012)  
770 km SSO  
25 x 10 x 7 m, 8000 kg

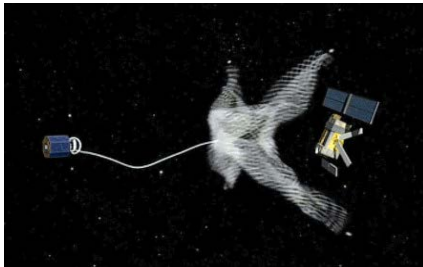
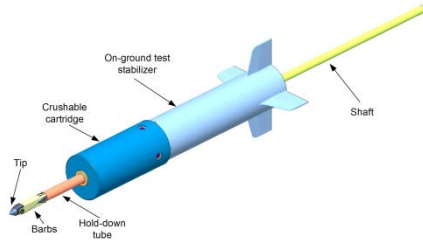
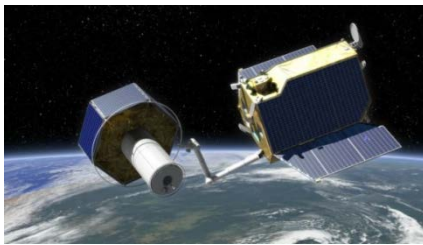


# Eine ganze Reihe an möglichen Methoden zur Beseitigung von Weltraumschrott wurden untersucht

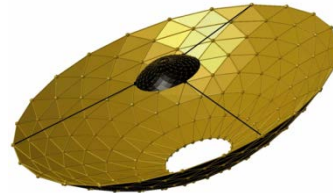
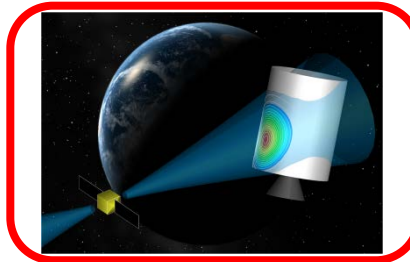
im Weltraum

vom Boden aus

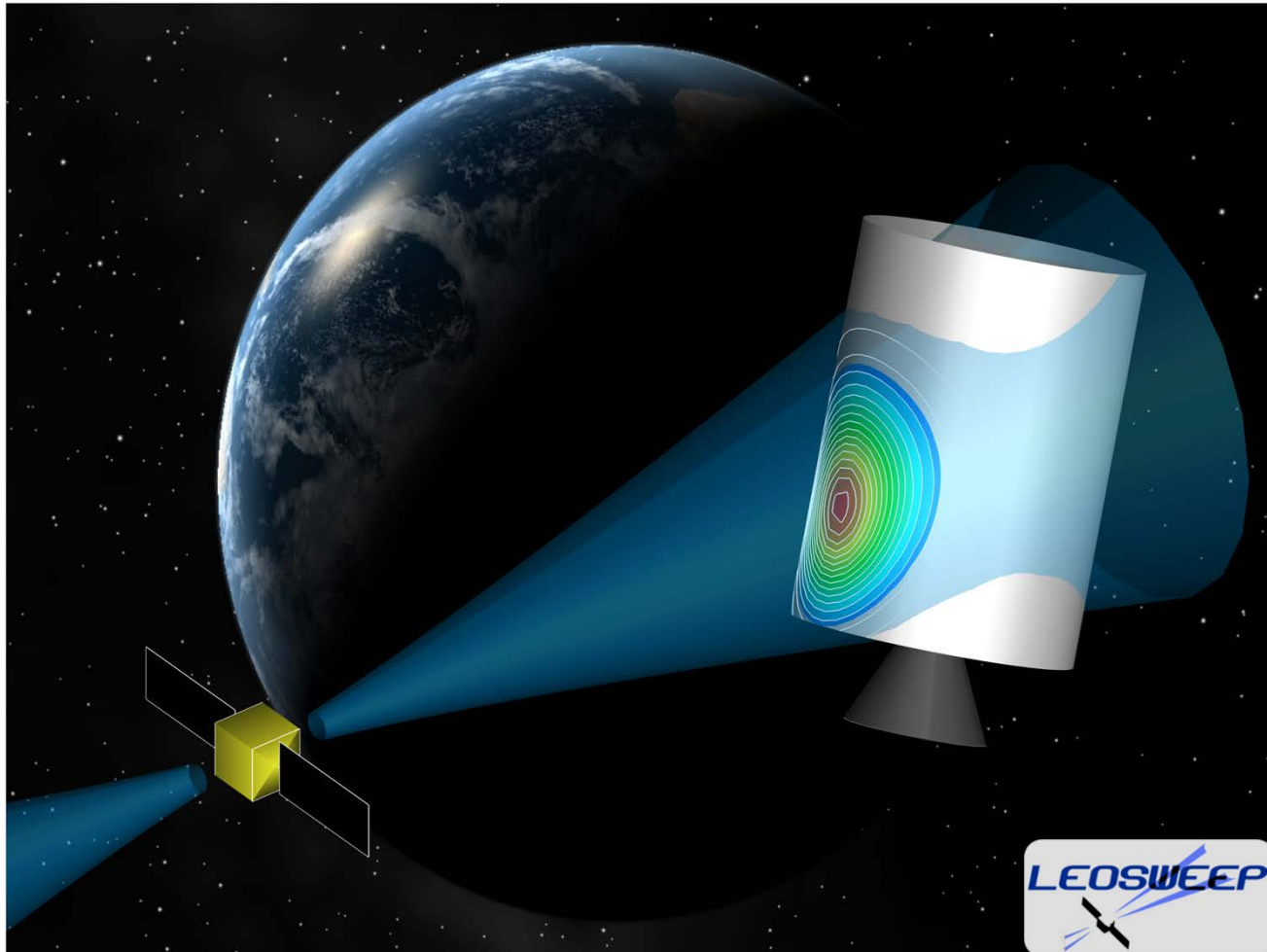
Kontakt



Fernwirkung

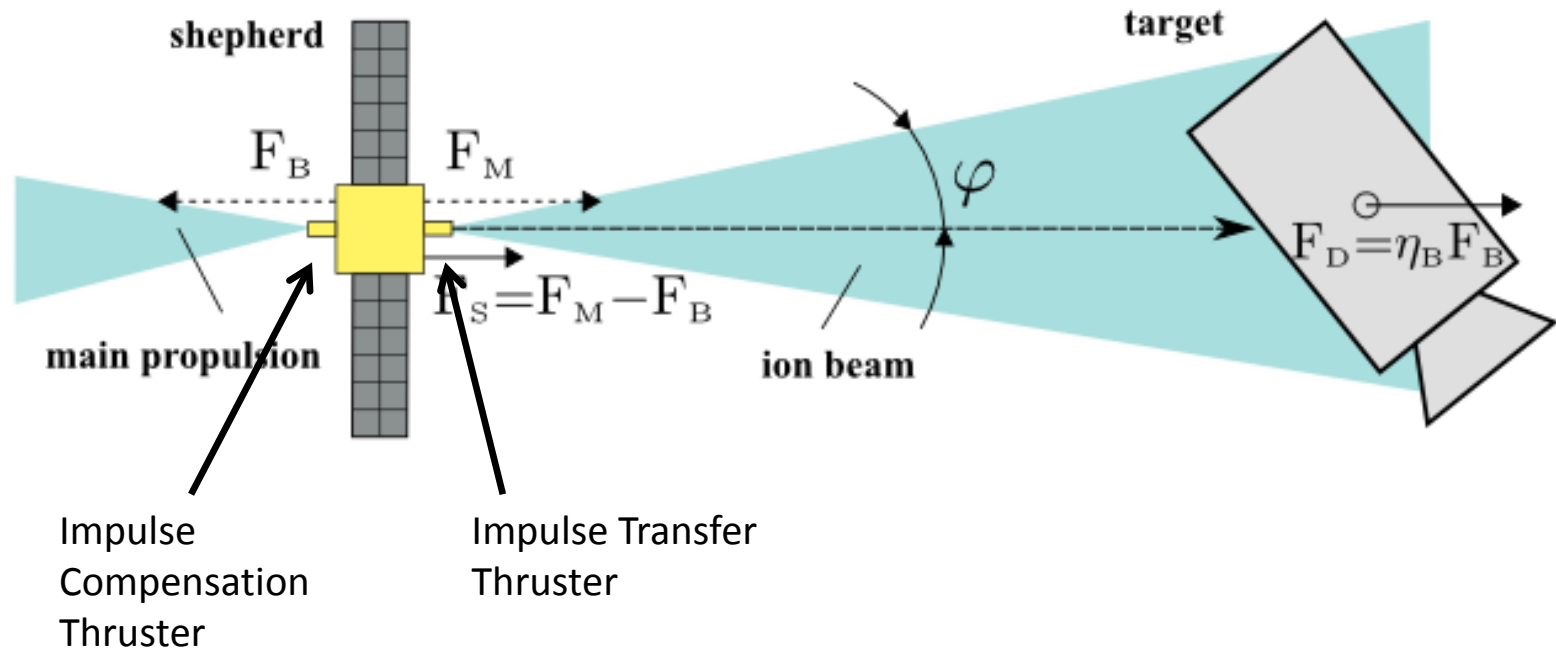


# Durch den Strahl eines Ionentriebwerk kann ein Impuls übertragen werden (Ion Beam Shepherding)





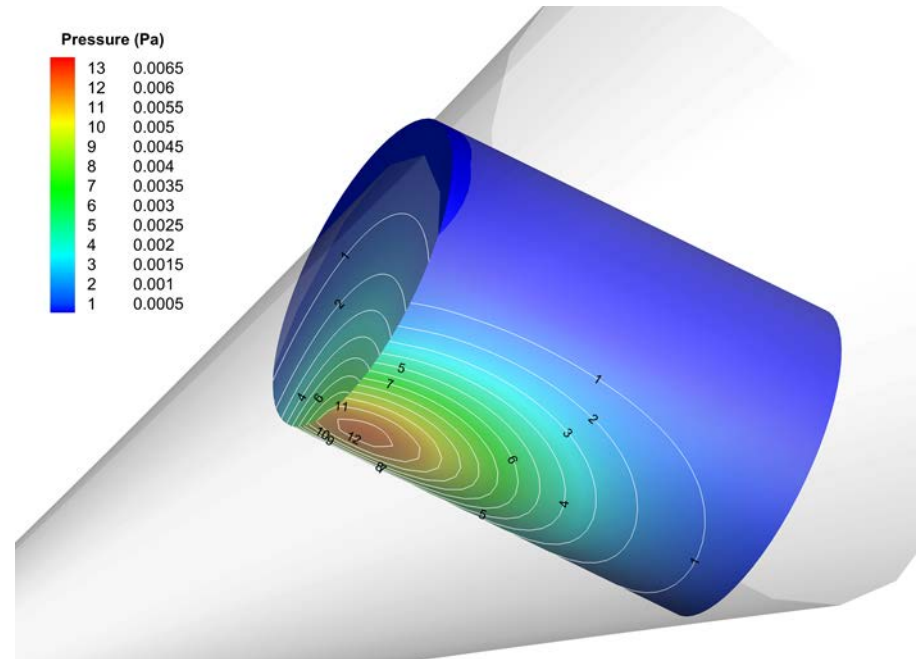
Ein zweites Ionentriebwerk ist nötig, um den Abstand von einigen 10 Metern zum Schrottobjekt zu halten



# Leistungsfähige Ionentriebwerke mit geringer Strahldivergenz müssen entwickelt werden



Schub	31 mN
Spannung	3500 V
Leistung	1.4 kW
Spezifischer Impuls	5349 s
Strahldivergenz	4.1 deg



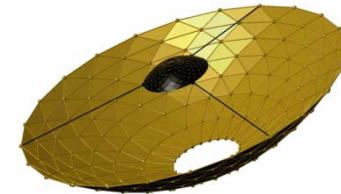
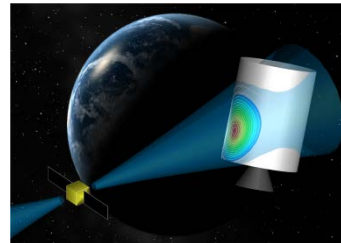
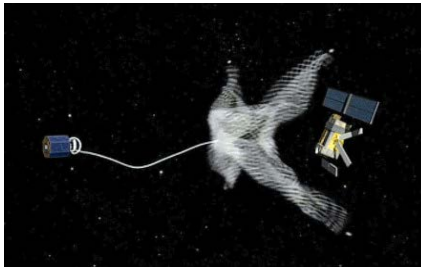
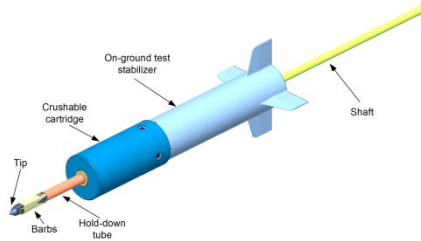
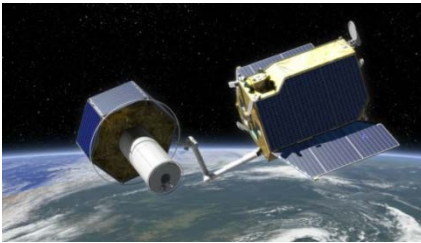
# Eine ganze Reihe an möglichen Methoden zur Beseitigung von Weltraumschrott wurden untersucht

im Weltraum

vom Boden aus

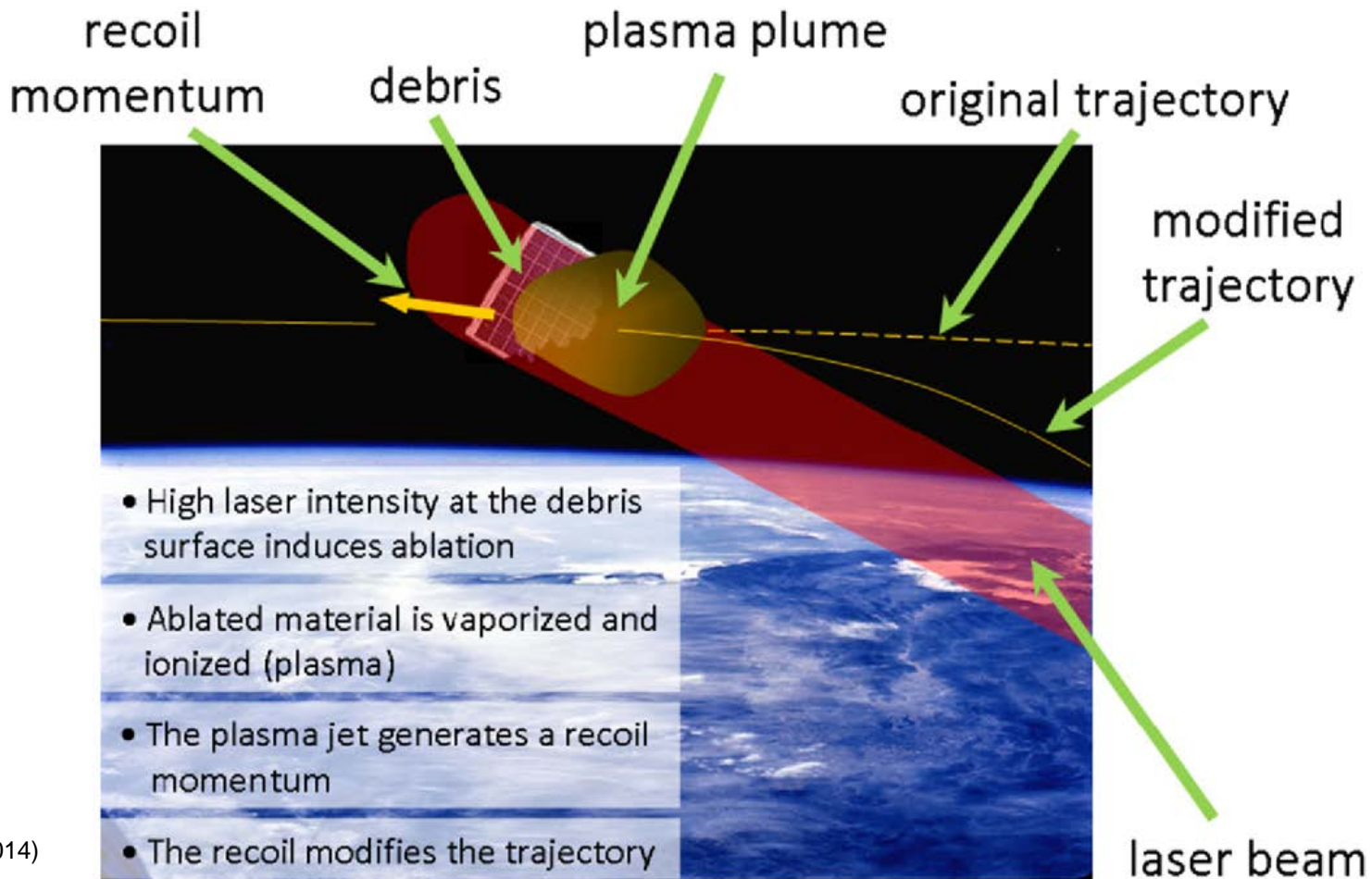
Kontakt

Fernwirkung



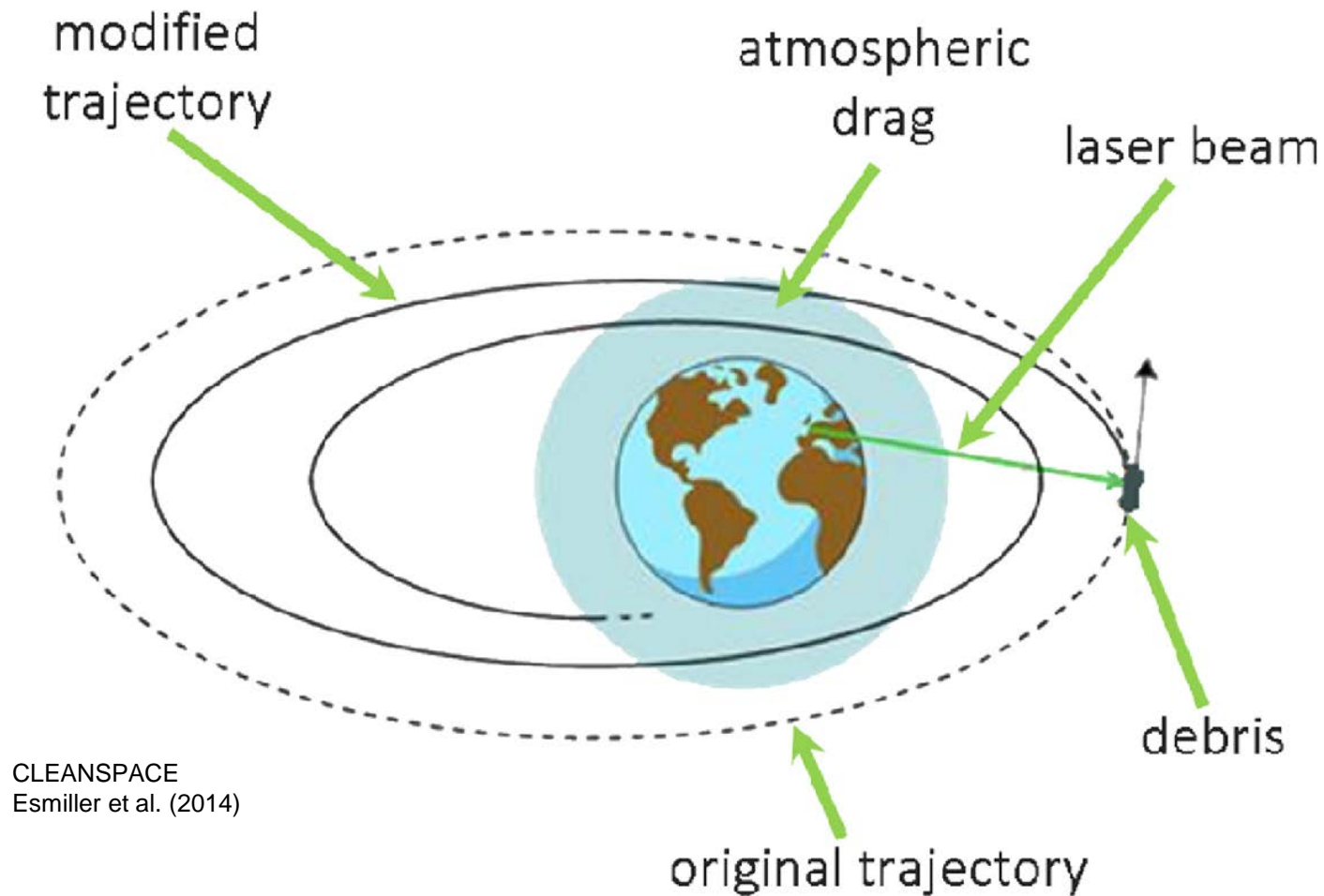


# Ein starker Laserstrahl verdampft Material auf der Oberfläche des Schrottobjekts (Laser Debris Removal)



CLEANSPACE  
Esmiller et al. (2014)

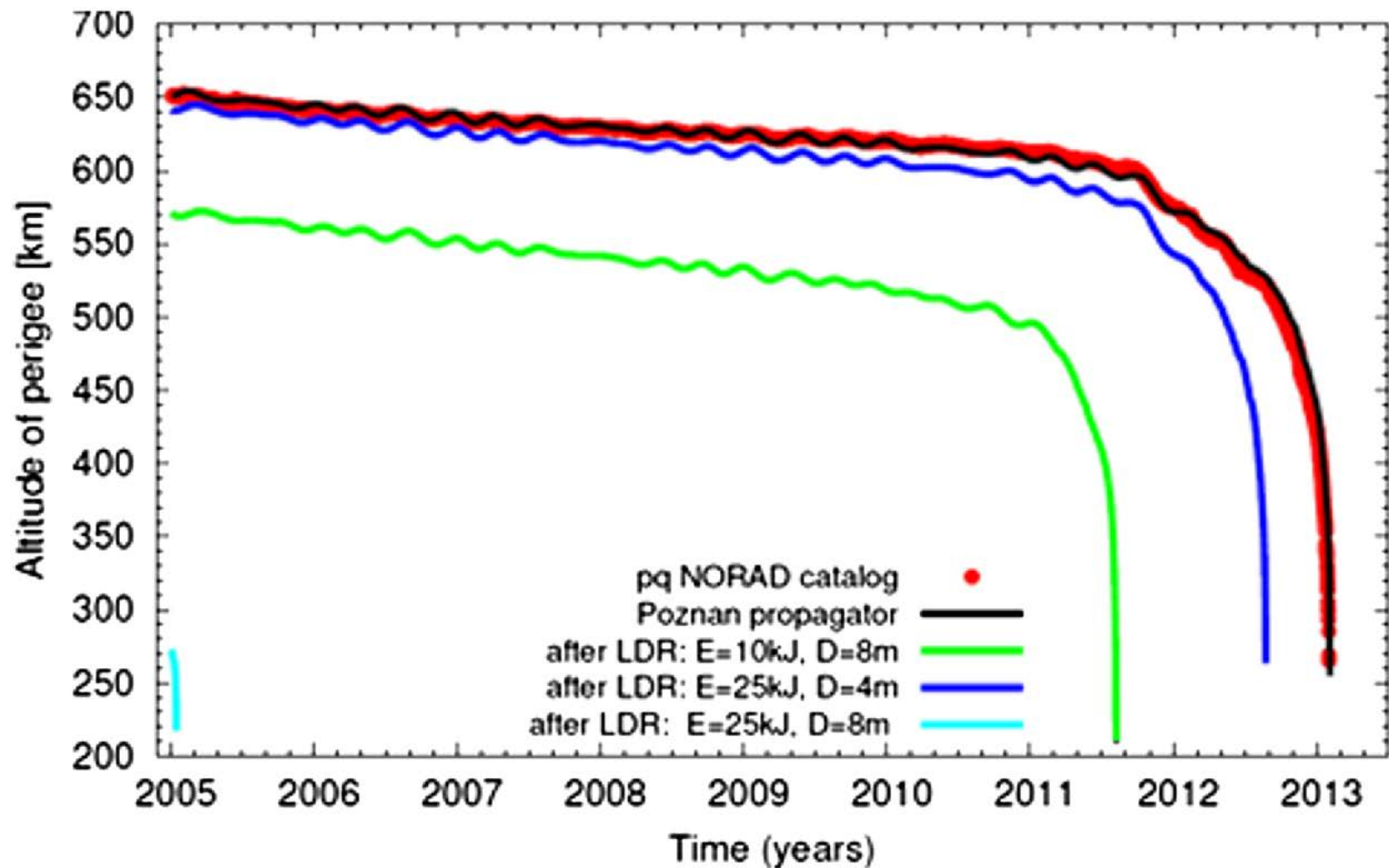
# Der Rückstoß durch die „Rauchfahne“ bremst das Schrottobjekt ab



CLEANSPACE  
Esmiller et al. (2014)



Durch wiederholte Bestrahlung wird die Bahnhöhe verringert, sodass das Objekt in der Atmosphäre verglüht

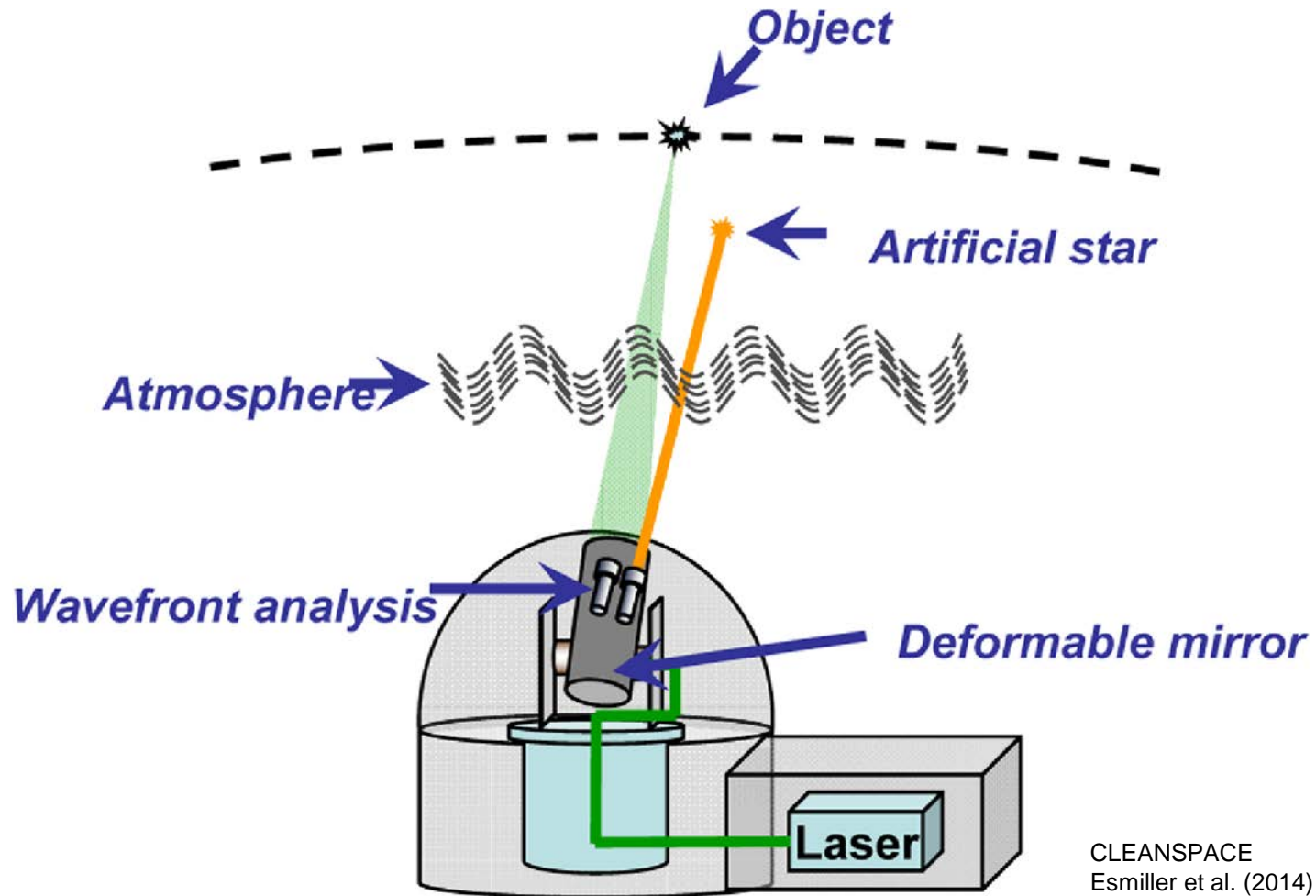


CLEANSPACE  
Esmiller et al. (2014)





Benötigt werden ein 10-kJ-Laser und ein 8-m-Klasse Teleskop mit adaptiver Optik sowie eine genaue Richtung



CLEANSPLACE  
Esmiller et al. (2014)

# Zusammenfassung



- Die meisten orbitalen Objekte erfüllen keine Funktion mehr — Weltraumschrott
- Weltraumschrott entsteht beim Start von Raketen, der Inbetriebnahme und dem Auseinanderbrechen von Satelliten sowie durch Kollision mit anderen Objekten
- Besonders stark betroffen ist der niedrige Erdborbit um 800 km Bahnhöhe
- Richtlinien zur Vermeidung der Entstehung von neuem Weltraumschrott existieren für zwei Schutzzonen (niedriger Erdborbit, geostationäre Bahn)
- Richtlinien reichen nicht aus, um das Wachstum der Schrottmenge zu begrenzen
- Methoden zur aktiven Beseitigung von Weltraumschrott werden intensiv untersucht
- Demonstrierungen/Ergebnisse dieser Methoden erst im nächsten Jahrzehnt...



# Danksagung

- Kollegen vom DLR, Institut für Technische Physik
- Claudio Bombardelli (Universidad Politecnica de Madrid, Spanien)
- Lourens Visagie (Stellenbosch University, Südafrika)
- Mark Schenk (University of Bristol, Großbritannien)
- Hugh Lewis (University of Southampton, Großbritannien)
- Mark Matney (Johnson Spaceflight Center, USA)
- Constantin Sandu (COMOTI, Rumänien)





# Vielen Dank!

Aktuelle Informationsquelle zum Thema Weltraumschrott:

**Orbital Debris Quarterly News (ODQN)**

<https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/newsletter.html>



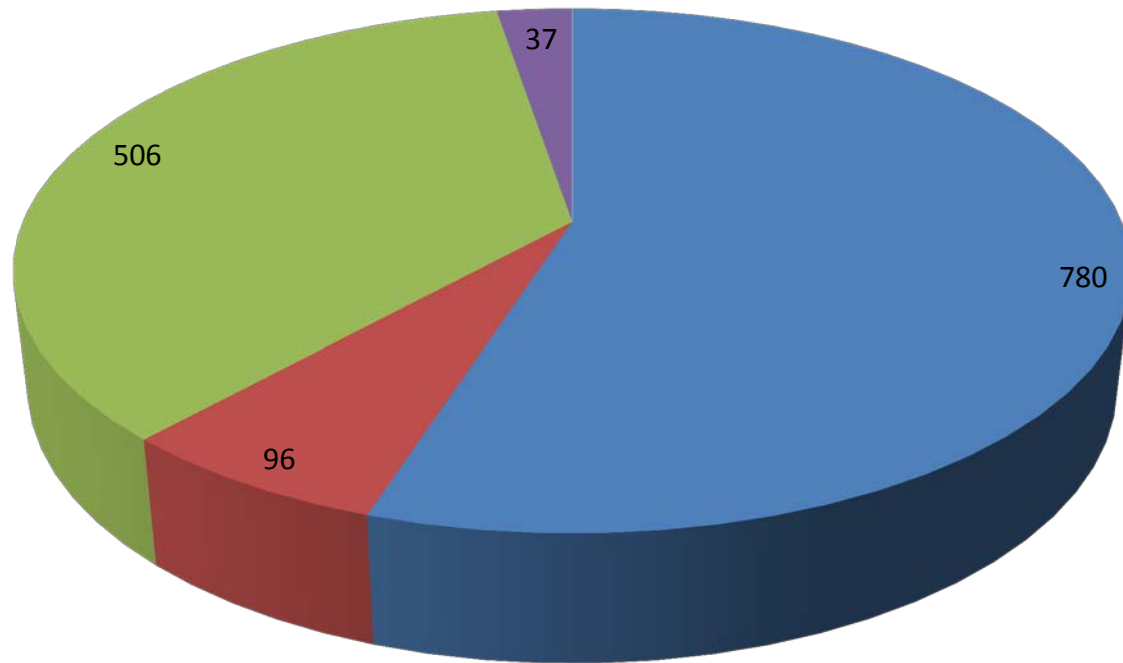
Wissen für Morgen



# Back-up slides



**~55% aller aktiven Satelliten im LEO, ~35% im GEO**



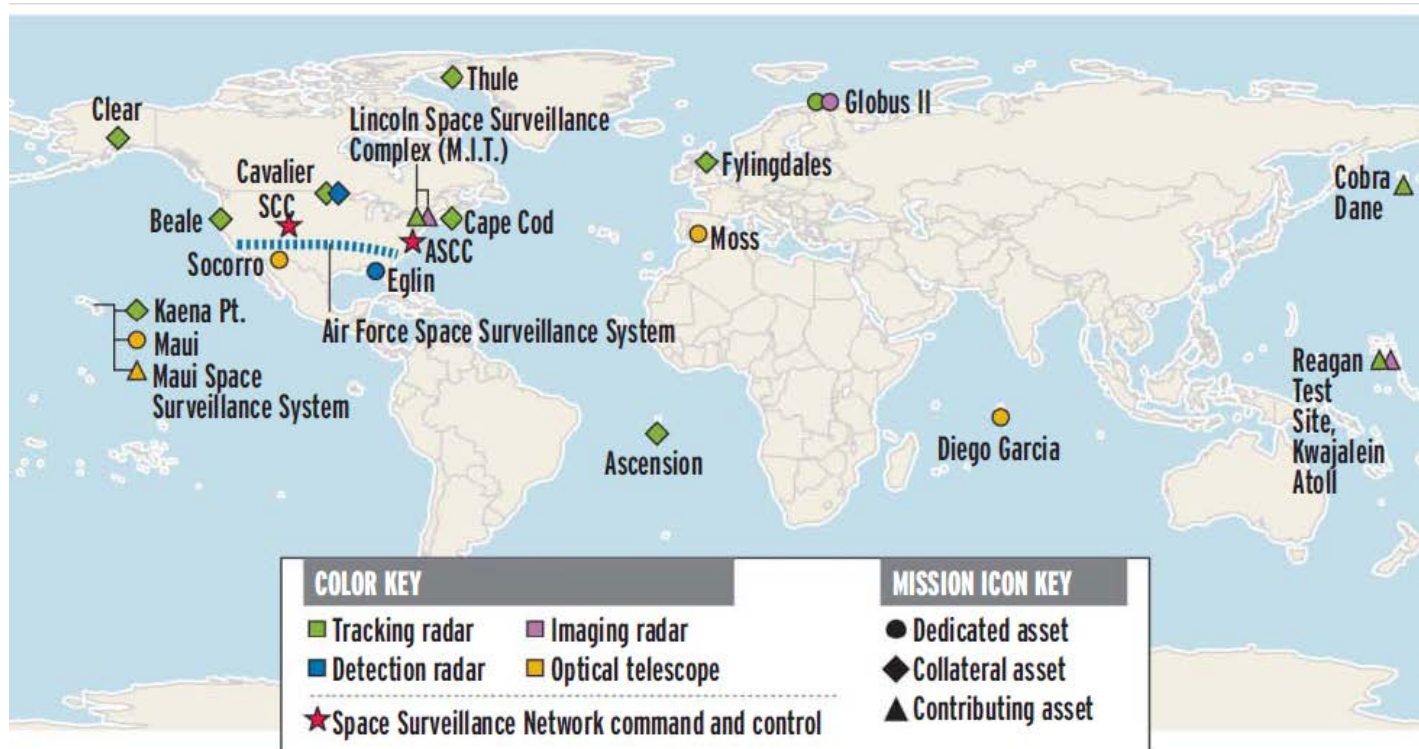
■ LEO ■ MEO ■ GEO ■ Elliptisch

UCS Satellite Database,  
Stand Juli 2016





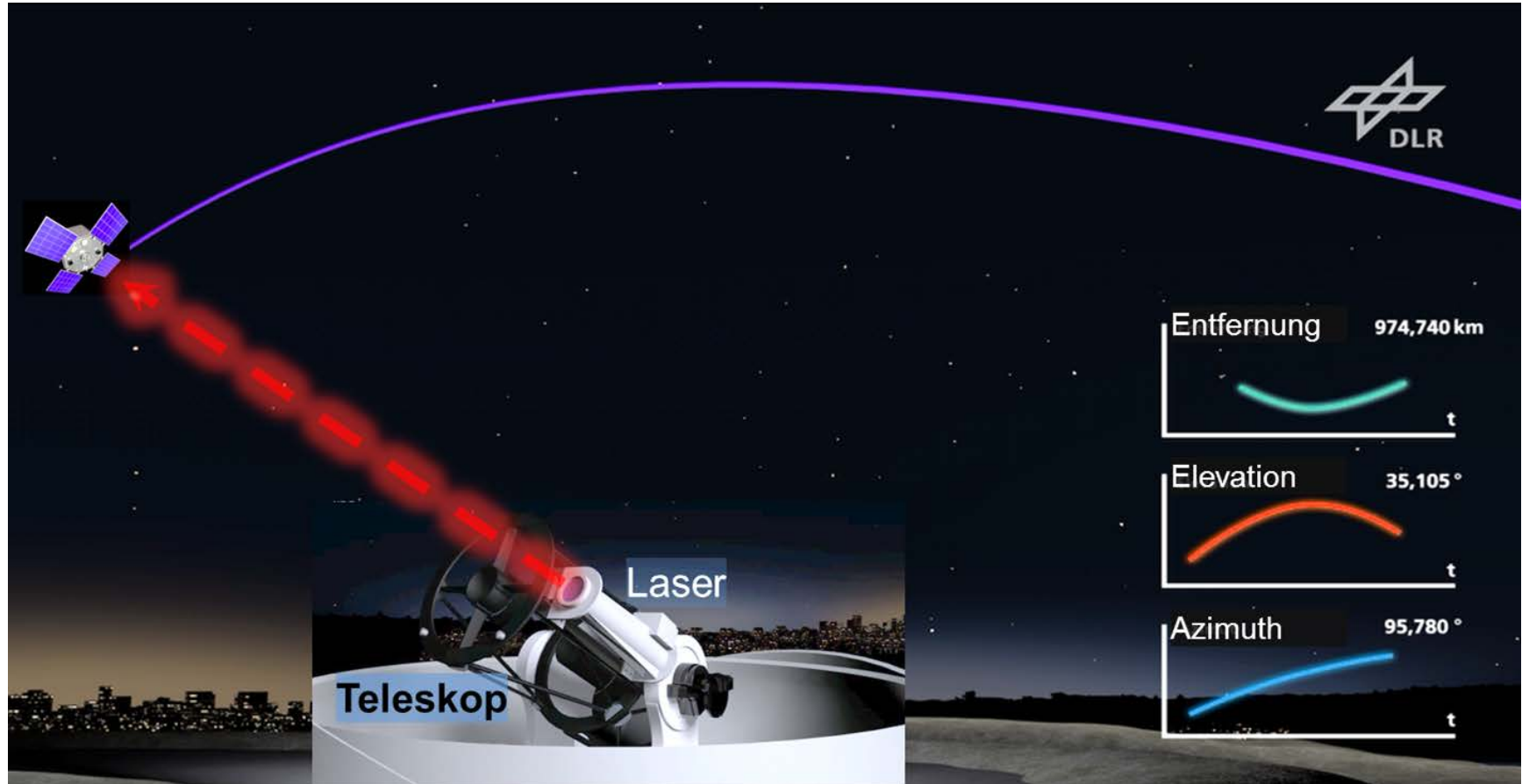
# Das US Space Surveillance Network (US SSN) besteht aus 31 Bodenstationen zur Überwachung von LEO+GEO



- Ca. 80000 Beobachtungen/Tag mit Grenzgrößen 5-10 cm (LEO), ~30 cm (GEO)
- **Problem: Genauigkeit der veröffentlichten Bahndaten nur ~100 m...5 km**



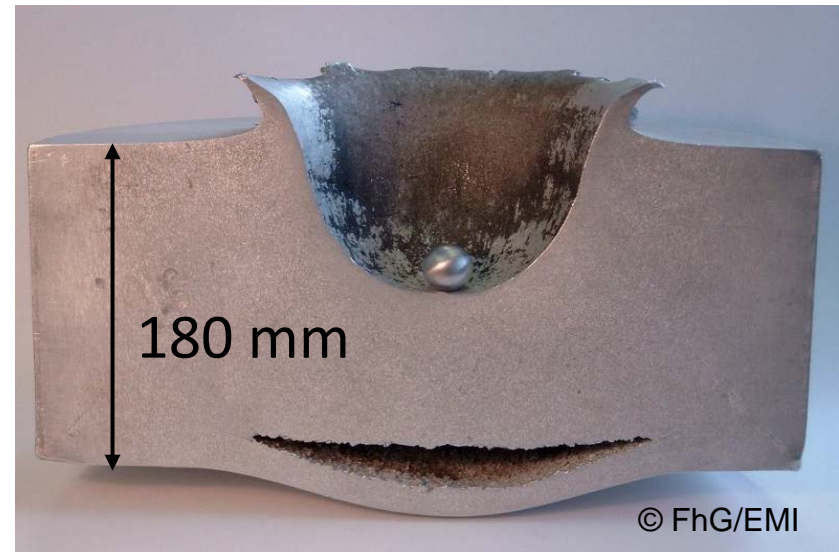
# Passiv-optische Detektion und aktiv-optische Ortung durch Laufzeitmessung von Laserpulsen



# Der Einschlag eines Schrottobjektes führt zur Beschädigung oder Zerstörung des Weltraumsystems



Einschläge auf HST-Solarpanel nach 8 Jahren im Orbit: 4 Einschläge / m<sup>2</sup>



Einschlag einer 12 mm Al-Kugel mit 7 km/s auf Al-Platte (Dicke 180 mm)

- Bemannte Systeme verfügen über Eigenschutz bis ca. 1 cm Objektgröße
- Die meisten anderen Weltraumsysteme sind ungeschützt!





# Key design equations

## POWER & PROPELLANT REQs:

- **Power** needs from 2 thrusters:

$$P_{BUS} = \frac{g_0}{2\eta_{PPU}} \left[ \left( \frac{F \cdot I_{sp}}{\eta_T} \right)_{ITT} + \left( \frac{F \cdot I_{sp}}{\eta_T} \right)_{ICT} \right] = \frac{\pi I_{sp} g_0 m_{eq}}{2\eta_{PPU} \eta_T T_{orb}} \dot{h}$$

where the **formation equivalent mass** is:  $m_{eq} \approx m_{IBS} + \frac{2m_T}{\eta_B}$  (=m<sub>IBS</sub> during transfer)

- **Fuel :** 
$$m_P = \left[ \left( \frac{F}{I_{sp} g_0} \right)_{ITT} + \left( \frac{F}{I_{sp} g_0} \right)_{ICT} \right] \Delta t + (m_P)_{RCS} \approx \frac{\pi m_{eq} \Delta h}{T_{orb} \cdot I_{sp} g_0} + (m_P)_{RCS}$$

## TOTAL ESTIMATED IBS MASS:

$$m_{IBS} = \alpha \cdot P_{BUS} + m_P + m_{str}$$

## Example

- Move Envisat ( $m_T = 8050$  kg  $T_{orb} = 100$  min) by 50 km down in 4 months
- Assume: No thrust during eclipses, 25 m separation,  $I_{sp} = 3000$  s,  $\eta_B = 0.5$ ,  $\eta_B \eta_{PPU} = 0.6$ ,  $\alpha = 15$  kg/kW
- Results:  $P_{BUS} = 3$  kW,  $m_P = 60$  kg (including 30% RCS and margins),  $m_{IBS} \approx 350$  kg (including 150 kg structure and margins)

